作物模式應用新契機-以番茄作物模式 TOMGRO 為例

康樂[1]、陳柱中[2]

[1] 農業部農業試驗所作物組助理研究員

[2] 農業部農業試驗所農業化學組副研究員

摘要

自動介接溫室氣溫及光強度，並經由修正後之番茄生長及產量動態模型 TOMGRO，可模擬以慣行方式栽培大果番茄「993」之葉面積指數、主幹節數、地上部乾重及累積產量變化，R^2 值分別為 0.890、0.998、0.888 及 0.996。而應用大氣氣溫預報資料，也可經推估後轉成作物模式所需環境數據，對於光強度的 R^2 值可達 0.92，擴展作物模式用於模擬未來情境。影像分析技術的發展則可幫助快速評估作物即時狀態，如影像平均綠色比率與光截取率高度相關、R^2 值超過 0.95，可用於快速建立作物模式中不同品種之參數，或提供栽培管理決策資訊。隨著資通技術與大氣科學預報技術發展，作物模式可更容易即時運算並可擴展應用範圍，有助於智慧農業發展。

一、前言

作物模式化係指利用一連串數學方程式，描述作物隨時間變化而改變的發育與生長狀態，一方面可以協助研究者進行作物生長模擬研究，另一方面也可以藉由轉化研究結果產出栽培管理決策建議，協助栽培者進行不同尺度之栽培管理應用。不過由於影響作物生長的因子眾多，且作物模式通常含有大量方程式，需要投入眾多觀測資料及大量運算，加上作物品種變更速度快，而不同作物品種常需要先建立其作物模式所需之參數組，因此在傳統上常趕不及回應栽培管理的即時需求，降低了作物模式的應用性。而隨著智慧農業發展，農業栽培環境甚至是個別溫室內之微氣象的即時監測已逐漸普及，另一方面隨著影像分析等表型技術發展，機器學習與演算法的快速開發，讓我們更有機會同時處理多個變數並且增加準確度，這都增加了作物模式參數校正與即時計算的可能性，使作物模式的應用產生新契機。

二、材料與方法

(一) TOMGRO 模式參數本土化

TOMGRO 係由 JW Jones 在 1991 年發表之番茄生長及產量動態模型，主要以碳平衡的角度模擬溫度與光照對番茄之生長及產量變化，模式的輸入資料包括溫室內每小時溫度與光量子通量密度 (PPFD)，移植期的葉面積、地上部乾重及節數，模式輸出檔為每日的主幹節數、地上部乾重、果實乾重、成熟果實乾重，透過水分含量可轉換為果實鮮重。本研究自 2020 年起於農業試驗所之溫室，以離土栽培大果番茄主流商業品種「993」，確保栽培期間符合 TOMGRO 之水養分供應充足之假設；栽培期間每周調查番茄主幹節數、葉面積及果實大小及產量等數據，並架設溫室環境監控設備，自動記錄溫

室內外溫度、濕度及光量子等環境數據，最後整合作物生長及環境數據，進行 TOMGRO 模擬驗證，並進行部分參數及方程式之修改，使本番茄作物模式之模擬結果可更貼近本土實際觀測結果。

(二) 資訊系統資料介接與重要環境參數推估

由於目前許多資訊系統適用 Python 語法，因此將本作物模式以該語法建立，以便利於後續不同系統介接或包埋使用，另一方面透過 API，自動向溫室環境監控系統取得環境資料，並將其轉化成作物模式所設定之時間尺度，使環境資訊可自動取得，不必再透過檔案之格式進行資料傳遞，加速歷史即時資料之運算速度。

而為了要建立預測能力，經由資訊系統介接公開氣象預報資料，並建立示範溫室重要環境參數與附近氣象資料之關聯，使公開之氣象預報資料可轉換為示範溫室之未來推估環境資料，進而推估預報期間之作物生長及產量。

(三) 影像分析技術之建立及應用

為了評估影像分析技術用於作物模式重要參數調查之可行性及應用性，本研究一方面調查番茄生長及生產數據，另一方面開發對應之影像分析程式，分析畫面中平均綠色比率及不同成熟階段之果實重量，比較實際調查與影像分析結果，評估影像分析技術之應用性。

三、結果與討論

(一) 大果番茄「993」的作物模式模擬

將農業試驗所 19 號田溫室 D 棟之環境參數 (溫度及光強度)，分別以 TOMGRO (JW Jones, 1991) 及 STICS (Valdez-Gomez H, 2014) 模式及其預設參數進行模擬，並與大果番茄的「993」生長參數實際調查數值比較，結果顯示兩個公開的模式在參數調整前模擬結果與實際調查數值及趨勢皆有明顯差異 (圖 1)，明顯不符合我國大果番茄實際生長狀況。經由調整模式內預設參數，STICS 模式仍無法有效改善其模擬之準確度，而調整 TOMGRO 參數後，模式葉面積指數模擬結果與實際生長參數有明顯改善 (圖 2)，展現出近一步應用之潛力。

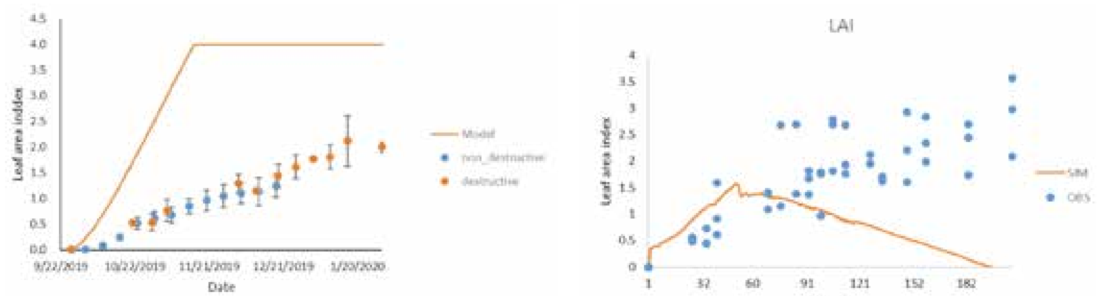

圖 1. TOMGRO (左) 及 STICS (右) 模式之預設參數對葉面積指數之模擬結果 (紅線) 及實際調查結果。

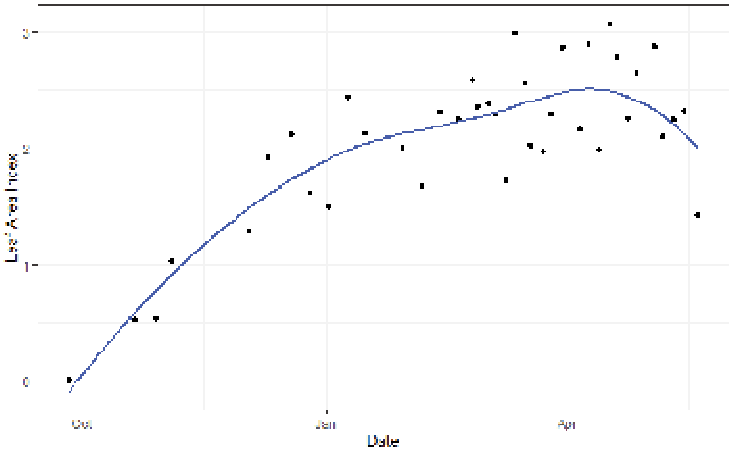

圖 2. 校正預設參數後，TOMGRO 模式對於葉面積指數之模擬結果 (藍線) 及實際調查結果 (黑點)。

另由於我國慣行栽培時，會移除部分老葉，且非停心型的大果番茄「993」在經過一段時間之栽培後，常於栽培期結束前摘心，以方便栽培管理以及促進產期後期之產量。因此我們在模式內，修改部分方程式，設定葉面積指數上下限，模擬番茄生長期間移除老葉葉面積與乾重；另設定最大節數門檻，停止新葉生長。使用多年期的資料進行參數校正調整，結果調整後之作物模式，在葉面積指數、主幹節數、地上部乾重及累積產量上，模擬結果與實際調查數值差異明顯降低，觀測值與模擬值 R^2 接近或高於 0.9、斜率界於 0.76-1.1 之間 (圖 3)，顯示經調整之作物模式，在輸入溫室實際量測之環境參數後，已有大果番茄「993」生長參數良好的模擬能力。

(二) 環境參數推估

由於調整後的作物模式可用以模擬溫度與日射量對於番茄生長與產量影響，為增進作物模式之應用性，我們嘗試引入氣象署之預報資料，轉換為溫室內的溫度與光照預報，進而應用作物模式預測未來情境對大果番茄「993」之生長及生產。

氣象署的預報資料僅有特定地點之大氣環境氣溫預報，必須先產生溫室內光強度及溫度之推估數值，才能符合本作物模式的需求。因此我們利用氣象署位於農業試驗所內之氣象站資料，以及 19 號田溫室 D 棟 (19-4) 及另外一間同為塑膠布溫室之 13-6 溫室的實測資料進行兩者模式化，一方面進行溫室內光強度 (PPFD) 之推估，另一方面以不同方程式進行溫室內溫度之推估 (圖 4)。

模式化的結果，純應用氣溫進行日射量推估與該氣象站資料之歷史資料有一定之準確度 (圖 5)；且進一步使用此日射量推估數值計算溫室內外溫差後，所計算之溫室內部氣溫推估值比直接使用戶外溫度與室內溫度的回歸方程式，有更佳的推估效果，R^2 值可從 0.85 提升至超過 0.92 (圖 6)。

模式化的結果，純應用氣溫進行日射量推估與該氣象站資料之歷史資料有一定之準確度 (圖 5)；且進一步使用此日射量推估數值計算溫室內外溫差後，所計算之溫室內部氣溫推估值比直接使用戶外溫度與室內溫度的回歸方程式，有更佳的推估效果，R^2 值可從 0.85 提升至超過 0.92 (圖 6)。

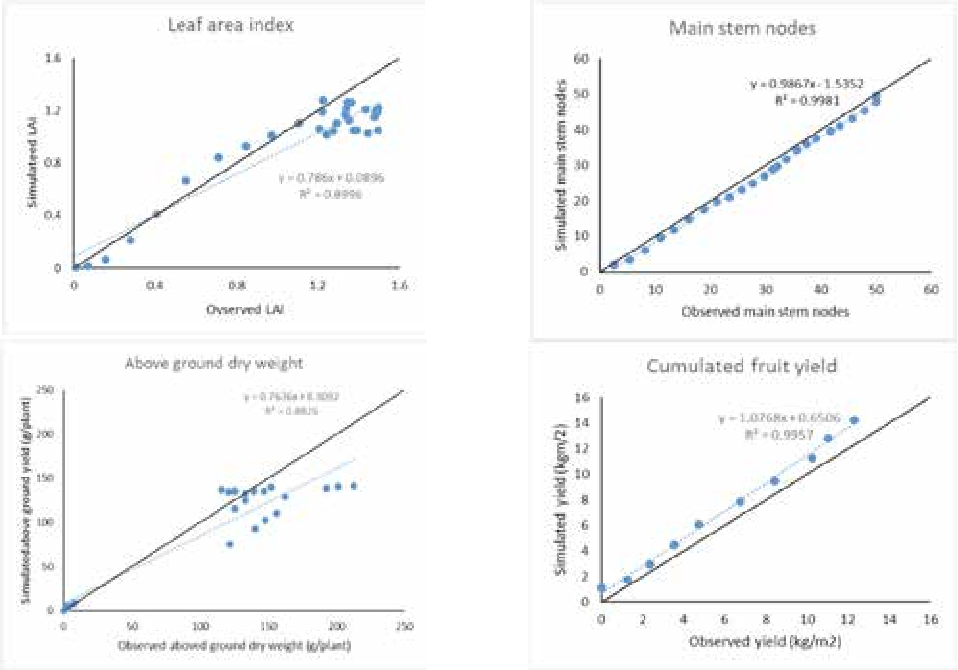

圖 3. 經修正之作物模式，對大果番茄「993」葉面積指數 (左上)、莖節數 (右上)、地上部乾重 (左下) 及累積產量 (右下) 之模擬數值 (縱軸) 與實際調查數值 (橫軸) 之散佈圖，黑色實線為 1:1。

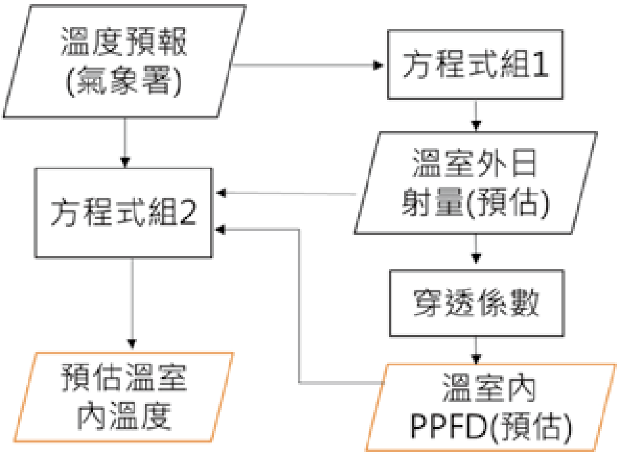

圖 4. 應用氣象署溫度預報進行溫室內溫度及光強度 (PPDF) 推估之流程圖。

(三) 影像分析驗證

在 2023 秋作期間，我們逐周抽樣調查大果番茄「993」的生長參數來計算葉面積指數，使用 A.P. Papadopoulos 等人 (1997) 建議的參數估算光截取率 (%)，並與影像分析之畫面平均綠色面積比率 (%) 進行比較，結果發現兩者關係密切，R^2 高於 0.95 且線性回歸斜率接近 1 (圖 7)，顯示影像分析畫面綠色比率，可有效用於推估番茄葉面積指數，

也可與環境參數經作物模式估算之葉面積指數進行比較，協助作物模式參數調整或是作為植物健康程度的評估指標。

而透過影像分析之成熟果實重量，可能受限於影像畫質及影像分析精準度不足，與實際逐周採收之產量差異較大，R^2 值僅達 0.66 (圖 8)，仍有待持續開發影像分析技術。

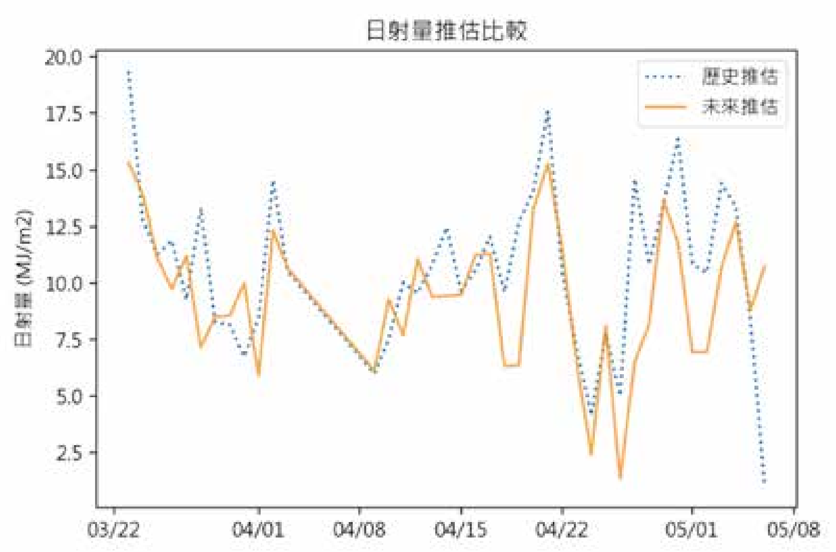

圖 5. 農業試驗所氣象站之實際計算日射量 (藍色虛線) 及應用溫度所推估之日射量 (橙色實線) 折線圖。

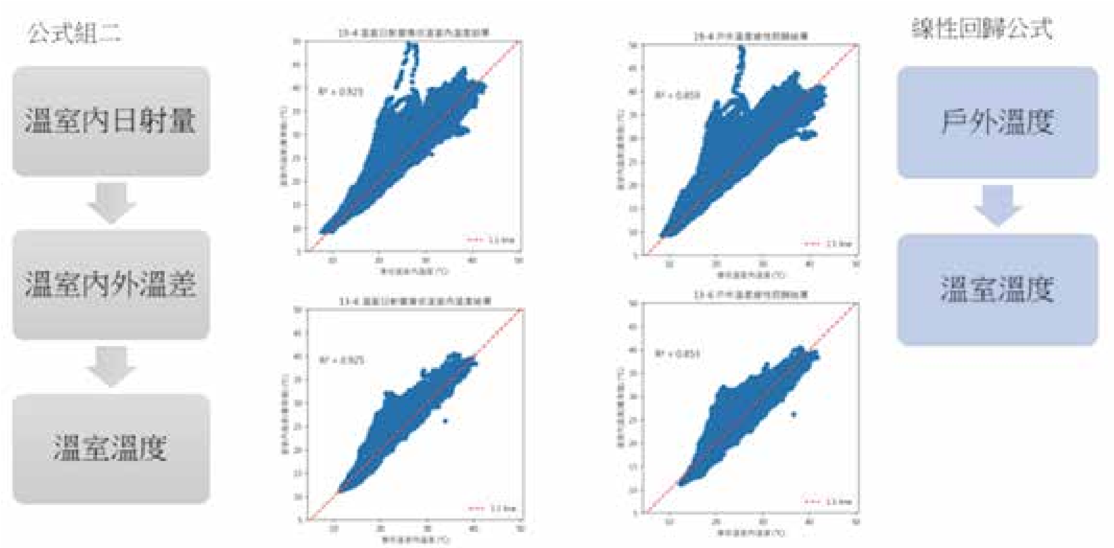

圖 6. 農業試驗所 19-4 (上) 及 13-6 (下) 溫室以不同推估流程之溫室室內推估溫度 (橫軸) 與實際量測溫度散佈圖。

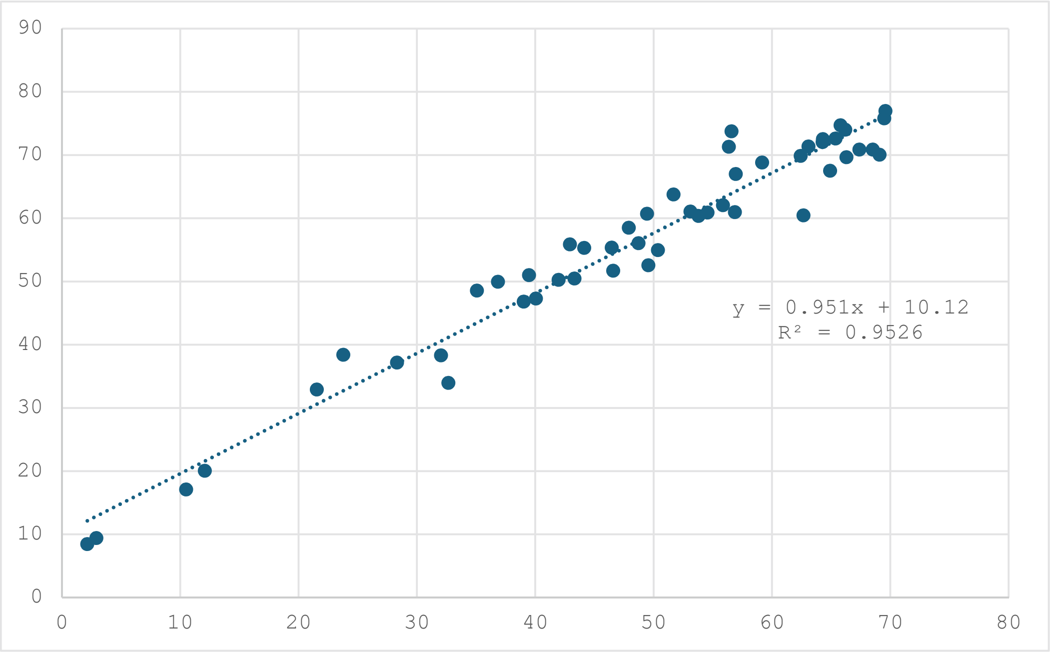

圖 7. 實際調查數值估算之光截取率 (%) (橫軸) 與影像分析之畫面平均綠色面積比

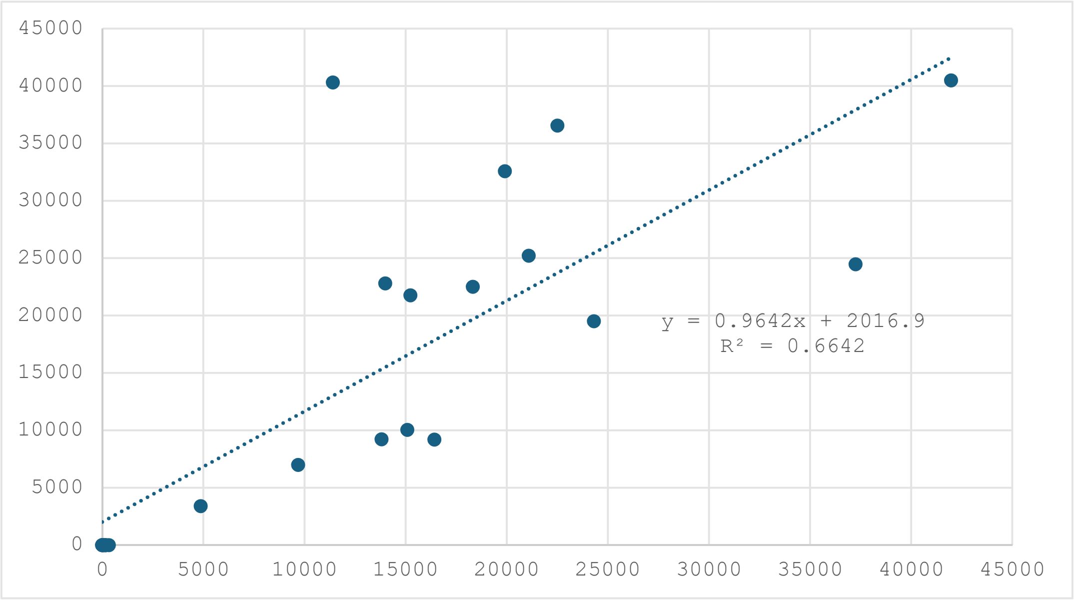

圖 8. 影像分析之成熟果實重量 (g) (橫軸) 與實際採收之產量 (g) (縱軸) 散佈圖。

四、結論

作物模式的開發及相關研究已有長久的文獻基礎，但早期因為環境參數及作物生長參數調查較為耗時、內含方程式較為複雜、且不同作物品種及栽培方式也可能需要不同的參數組，在應用上常無法即時修正參數並作出模擬計算，降低了在栽培管理上的應用性。

本研究以我國慣行栽培模式、多年期調查番茄生長及生產的數據，修正 TOMGRO 內部分參數及部分方程式，改善了作物模式對於大果番茄「993」主幹節數、葉面積指數、地上部乾重及累積產量等的估算準確度，並且應用公開之氣象預報資料，估算符合作物模式所需之未來環境參數，使作物模式的推估範圍可隨氣象預報技術發展而延展。

另一方面影像分析技術可提供作物生長及生產狀態的快速分析結果，可直接提供栽培者掌握作物即時資料，由於 TOMGRO 是假設番茄是在水及養分供應充足且植株健康狀態下，模擬番茄在不同氣溫及光度環境下之生長及生產狀況，因此若番茄實際之生長與生產狀態偏離預測結果，可能暗示栽培管理或植株健康狀態有所變化。

由上可知，隨著資通訊及氣象預報技術的發展，可擴展作物模式的應用方便性，快速校正作物參數、及時評估作物狀態與未來發展推估，進一步邁向智慧生產的目標。但相關資訊整合技術及栽培管理操作建議，可能已非一般生產者可完全掌握，需要分工由其他業者提供服務。因此作物模式不僅從生產端協助作物，同時也可能促成新產業，是推進我國智慧農業完整發展的重要一環。

參考文獻

1. Jone, J. W., E. Dayan, L. H. Allen, H. Van Keulen, and H. Challa.1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). Transactions of the ASAE 34:0663–0672.
2. Valdez-Gomez, H., C. Gary, N. Brisson, and F. Matus. 2014. Modelling indeterminate development, dry matter partitioning and the effect of nitrogen supply in tomato with the generic STICS crop-soil model. Sci. Hort. 175: 44-56.20.
3. A.P. Papadopoulos, S. Pararajasingham, The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.): A review, Scientia Horticulturae, Volume 69, Issues 1–2, 1997, Pages 1-29, ISSN 0304-4238, https://doi.org/10.1016/S0304-4238(96)00983-1.

New opportunities for crop model application

Le Kang[1] Chu-Chung Chen[2]

[1] Assistant Researcher, Crop Science Division, TARI
[2] Associate Researcher, Agricultural Chemistry Division, TARI

ABSTRACT

The automatic integration of greenhouse temperature and light intensity data, along with the modified Tomato Growth and Yield Dynamic Model (TOMGRO), allows for the simulation of leaf area index, main stem node count, above-ground dry weight, and cumulative yield changes for the beef tomato variety "993" under conventional cultivation practices. By applying atmospheric temperature forecast data, it can also be used to estimate and convert into the environmental data required by crop models, expanding the simulation of future scenarios. The development of image analysis technology helps to quickly assess the real-time status of crops, establish parameters for different varieties in crop models, or provide decision-making information for cultivation management. With the advancement of information and communication technology (ICT) and atmospheric science forecasting, crop models can be more easily calculated in real-time, and their application scope can be expanded, contributing to the development of smart agriculture.

Keywords: Crop Model, Tomato, Smart Agriculture